Lean Production, Nachhaltigkeit

Von vertrauenswürdigen Daten zur Materialrückgewinnung

Technologische Bausteine für eine zirkuläre Wertschöpfung

12.10.2026 - von Vanessa Carls, Franziska Czernik, Sophia Fedder, Isabel Großkreuz, Saulo H. Freitas Seabra da Rocha Uwe Handmann, Lars Hofmann, Marc Jansen, David Rohrschneider

Lesedauer: 8 Minuten



© Adobe Stock/ LivingPixel

Zirkuläre Wertschöpfung und Materialrückgewinnung erfordert sowohl vertrauenswürdige Produktinformationen als auch geeignete Verfahren zur Rückgewinnung von Komponenten und Materialien. In der Praxis erschweren fehlende Daten, komplexe Strukturen und Produktvielfalt den Materialkreislauf. Praxisnahe Demonstratoren des Transferhubs Digitalisierung und Circular Economy zeigen, wie digitale Technologien und automatisierte Verfahren diese Hürden überwinden und Materialkreisläufe schließen können.

Damit Produkte, Komponenten und Rohstoffe in neue Wertschöpfungszyklen gelangen können, müssen Informationen und Materialflüsse zusammenspielen. In der Praxis liegen Produktdaten jedoch oft unstrukturiert vor, Lieferketteninformationen sind schwer nachvollziehbar und Altgeräte werden aufgrund ihrer Anonymität im Abfallstrom nicht auf Geräteebene behandelt. Digitalisierung und Verfahrenstechnik können an diesen Schnittstellen konkrete Beiträge leisten.

Im Transferhub Digitalisierung & Circular Economy im Prosperkolleg untersucht die Hochschule Ruhr West solche Ansätze anhand praxisnaher Demonstratoren. Dieser Artikel greift drei ausgewählte Anwendungsfelder auf, die unterschiedliche Ebenen zirkulärer Wertschöpfung adressieren: von der KI-gestützten Aufbereitung relevanter Produktdaten über deren vertrauenswürdige Weitergabe entlang der Lieferkette bis zur robotisierten Rückgewinnung von Komponenten und Materialien.

Produktinformationen für weitere Wertschöpfungszyklen

Welche Materialien sind in einem Produkt enthalten? Welche Komponenten lassen sich austauschen oder wiederverwenden? Und welche Informationen werden für Reparatur, Demontage oder Recycling benötigt? Solche Fragen lassen sich nur beantworten, wenn relevante Produktdaten verfügbar und strukturiert zugänglich sind.

Genau hier setzen die neuen Anforderungen der Europäischen Union an, insbesondere der Digitale Produktpass (DPP). Künftig sollen Produktinformationen über unterschiedliche Lebenszyklusphasen hinweg verschiedenen Akteuren der Wertschöpfungskette in einem einheitlichen Format zugänglich gemacht werden. Dazu können Angaben zu Materialien, Herkunft, Reparatur, Wartung oder Verwertung gehören [1].

Viele Industrieunternehmen, gerade kleine und mittlere Unternehmen, stehen dabei vor einer Herausforderung: Die benötigten Informationen liegen häufig verstreut über mehrere Systeme und Unternehmensgrenzen vor und ihr strukturiertes Zusammenführen verursacht einen erheblichen Aufwand [2].

Daher beleuchtet der Transferhub aus verschiedenen Perspektiven, wie digitale Tools dabei unterstützen können, solche Informationen automatisiert zu strukturieren und nachvollziehbar bereitzustellen. Ein Demonstrator extrahiert beispielsweise DPP-relevante Produktdaten aus unstrukturierten Texten oder PDF-Dateien.

Das Besondere: Anstelle eines proprietären LLM-Agenten wird hier zunächst auf ein lokales und speziell für die Informationsextraktion trainiertes Sprachmodell gesetzt. Dadurch lässt sich die Lösung mit kostengünstiger Hardware sowie ohne Abhängigkeiten zu externen Cloud-Providern ausschließlich lokal betreiben.

Während für klar abgegrenzte Aufgaben wie die Extraktion einzelner Produktmerkmale bereits kleine, spezialisierte Sprachmodelle ausreichen können, steigen die Anforderungen bei komplexen und heterogenen Produktionsdaten deutlich.

In einer weiterführenden Studie wurde deshalb untersucht, wie zuverlässig lokale und cloudbasierte LLMs Informationen aus unterschiedlichen Quellen in strukturierte DPP-Schemata überführen können. Wie in Bild 1 dargestellt, werden unter anderem Informationen aus Maschinen, Sensorik oder bestehenden Produktionssystemen zusammengeführt, die in der Praxis häufig in unterschiedlichen Formaten und Systemen vorliegen [3]. Für eine zirkuläre Produktion ist dies besonders relevant, da so Informationen aus verschiedenen Prozessschritten nicht nur erfasst, sondern auch konsistent nutzbar gemacht werden können.

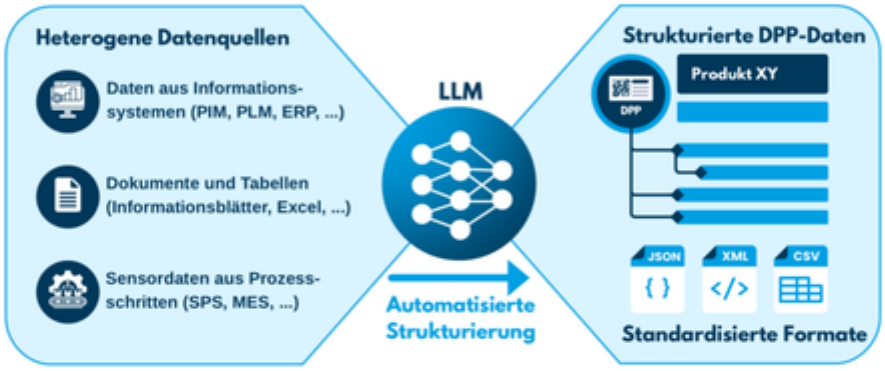


Bild 1: Schematische Darstellung der Überführung von heterogenen Datenquellen in strukturierte DPP-Daten © David Rohrschneider, Hochschule Ruhr West

Blockchain und KI für nachvollziehbare Lieferketteninformationen

Zirkuläre Produktion setzt voraus, dass Herkunft, Zustand und Historie von Materialien nachvollziehbar sind. In der Praxis sind diese Informationen jedoch häufig über verschiedene Akteure und Systeme verteilt. Besonders an den Übergabepunkten zwischen Unternehmen entstehen dadurch Lücken in der Datenkette.

Der DPP legt fest, welche Informationen ein Produkt über seinen Lebenszyklus begleiten sollen. Doch woher stammen diese Daten, und wie bleiben sie über viele Akteure hinweg vertrauenswürdig? Blockchain-Technologie setzt genau hier an: als dezentrales, manipulationssicheres Register, hier ergänzt durch KI, die Daten prüft und einordnet [4].

Ein Beispiel liefert die Nachverfolgung von Lieferketten: Jede Station, etwa Erzeuger, Verarbeiter und Händler, dokumentiert ihren Schritt fälschungssicher auf der Blockchain (Bild 2). Am Beispiel Holz erprobt, lässt sich im zugehörigen Pilotprojekt allein für den Schritt der Holzbereitstellungsmeldung eine Prozesszeitersparnis von rund 10 % erzielen [5]; der Ansatz selbst ist bewusst branchenagnostisch gedacht und auf beliebige Rohstoffe und Produkte übertragbar. Aktuell wird das Prinzip um eine KI-gestützte Vertrauensprüfung erweitert: Beim Wechsel zu einem neuen Akteur recherchiert und analysiert ein KI-System automatisiert öffentlich verfügbare Informationen über diesen und schätzt seine Vertrauenswürdigkeit ein, bevor dessen Daten übernommen werden. Ergänzt um RFID zur automatischen Datenerfassung entsteht so eine durchgängige, überprüfbare Historie für den DPP.

Ganz ohne Grenzen ist der Ansatz jedoch nicht: Blockchain garantiert, dass gespeicherte Daten unverändert bleiben, nicht aber, dass sie von Anfang an korrekt sind (Oracle-Problem) [6]. Die KI-basierte Akteursbewertung ist zudem nur so gut wie die verfügbaren Online-Informationen und ersetzt keine verbindliche Zertifizierung, kann sie aber sinnvoll ergänzen. Bei personenbezogenen oder schützenswerten Daten braucht es zusätzlich Verschlüsselungen oder Permissioned-Blockchain-Ansätze mit eingeschränktem Zugang [7], und hier fehlen gerade KMU oft niedrigschwellige Einstiegsmöglichkeiten.

Ganz ohne Grenzen ist der Ansatz jedoch nicht: Blockchain garantiert, dass gespeicherte Daten unverändert bleiben, nicht aber, dass sie von Anfang an korrekt sind (Oracle-Problem) [6]. Die KI-basierte Akteursbewertung ist zudem nur so gut wie die verfügbaren Online-Informationen und ersetzt keine verbindliche Zertifizierung, kann sie aber sinnvoll ergänzen. Bei personenbezogenen oder schützenswerten Daten braucht es zusätzlich Verschlüsselungen oder Permissioned-Blockchain-Ansätze mit eingeschränktem Zugang [7], und hier fehlen gerade KMU oft niedrigschwellige Einstiegsmöglichkeiten.

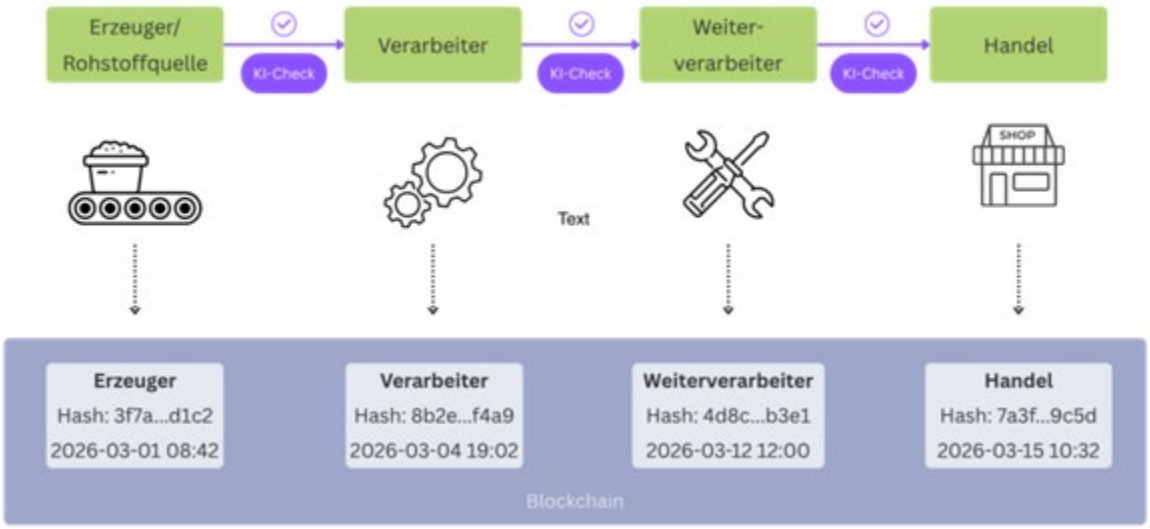


Bild 2: Lieferketten-Nachverfolgung mit KI-gestützter Vertrauensprüfung beim Akteurswechsel © Vanessa Carls, Hochschule Ruhr West

Eine flexible, blockchain-basierte Lösung ist im Transferhub bereits entstanden und erprobt. Als Nächstes werden die KI-gestützte Vertrauensprüfung und der RFID-Gate-Demonstrator im Transferhub gemeinsam weiterentwickelt, an realen Übergabepunkten getestet und schrittweise auf weitere Produktkategorien und Branchen ausgeweitet, um die Übertragbarkeit des Ansatzes über den Holz-Anwendungsfall hinaus zu zeigen.

Roboter trennen, was Schredder sonst vermischen

Elektroaltgeräte sind wertvolle Rohstofflager, aber schwer zugänglich. Besonders kleine Elektro- und Elektrokleingeräte variieren stark in Aufbau, Materialmix und Verbindungstechnik. Eine automatisierte Demontage nach dem Vorbild der ursprünglichen Produktion ist daher kaum realistisch. Im klassischen Recycling werden solche Geräte meist mechanisch zerkleinert. Dabei entstehen Materialgemische, die später nur aufwendig oder gar nicht trennbar sind.

Im Transferhub verfolgt das Circular Digital Economy Lab (CDEL) deshalb einen anderen Ansatz: Vorzerlegung vor der Zerkleinerung. Ziel ist keine vollständige zerstörungsfreie Demontage, sondern eine datenbasierte, robotisierte Fraktionierung. Altgeräte werden in Teilströme überführt, die sich besser mechanisch, metallurgisch oder chemisch aufbereiten lassen [8].

Als Demonstrator dient aktuell ein Akkuschrauber. Nach der Geräteidentifikation werden Geometrie und innerer Aufbau erfasst – äußerlich für Greif- und Bewegungsplanung, innerlich per Röntgen. Daraus entsteht eine Schnittstrategie, mit der sich Getriebe, Motor, Batterie und Elektronik im Griffbereich gezielt voneinander trennen lassen.



Bild 3: Aufnahme aus dem CDEL: Nach der Datenerfassung übergibt Roboter A den Akkuschrauber an Roboter B für die Fraktionierung © Mike Duddek, Hochschule Ruhr West

Die Fraktionierung erfolgt mit einem stationären Wasserstrahl: Ein Industrieroboter führt das Gerät entlang geplanter Schnittlinien durch den Strahl und erzeugt definierte Fraktionen. Dadurch werden kritische Vermischungen vermieden. Besonders relevant ist die Motorfraktion: Neodymhaltige Permanentmagnete haften im konventionellen Schredderprozess am Eisen an und gehen beim Einschmelzen in der Schlacke verloren. Als eigene Fraktion kann der Motor gezielt weiterbehandelt werden – mit deutlich besseren Chancen, kritische Rohstoffe wie Kupfer und Neodym zurückzugewinnen.

Herausfordernd bleiben Gerätevielfalt und -zustand, komplexer Aufbau, sowie fehlende Herstellerinformationen. Für industrielle Anwendungen müssen Erkennung, Greifen, Planen und Schneiden auch bei beschädigten oder verschmutzten Geräten robust, sicher und wirtschaftlich funktionieren. Die CDEL-Anlage ist darauf ausgelegt, mit diesen Unsicherheiten umzugehen und hersteller- sowie modellunabhängig ohne menschliche Intervention zu fraktionieren [9].

Aktuell überträgt das CDEL den Ansatz auf weitere Elektro- und Elektokleingeräte, darunter elektrische Zahnbürsten. Zugleich wird die nasschemische Aufbereitung ausgewählter Fraktionen weiterentwickelt, insbesondere für Motoren mit neodymhaltigen Permanentmagneten. Nach Schreddern und mechanischer Vorsortierung wird nicht trennbares Material in Säure gelöst und anschließend selektiv chemisch getrennt, ausgefällt oder elektrochemisch zurückgewonnen [10].

Langfristig soll der Prozess internationale Lieferabhängigkeiten von strategischen Rohstoffen verringern und hochwertige Sekundärrohstoffe als Basis für neue industrielle Produktion bereitstellen.

Technologien bedarfsgerecht einsetzen

Die vorgestellten Ansätze adressieren zwar alle Informations- und Prozessprobleme, müssen aber nicht gemeinsam eingesetzt werden. Liegen Produkt- oder Produktionsdaten bereits strukturiert vor, ist keine zusätzliche KI zur Harmonisierung erforderlich. Sind Informationen dagegen über Maschinen, Sensorik, Dokumente oder Systeme verteilt, kann KI helfen, sie zu extrahieren und zu vereinheitlichen.

Sollen diese Daten sicher an nachfolgende Partner weitergegeben werden, kann Blockchain ihre Herkunft und Unveränderheit nachvollziehbar absichern und zusammen mit Zugriffsrechten und Verschlüsselung unbefugte Einsicht verhindern. Gerade bei Zerlegung und Recycling fehlen häufig verlässliche Informationen zu Aufbau, Komponenten und Materialien. Der CDEL-Ansatz ist deshalb so ausgelegt, dass er weitgehend ohne Zusatzinformationen auskommt. Sind vertrauenswürdige Produktdaten allerdings verfügbar, können sie die Zerlegung weiter verbessern, Stoffströme gezielter trennen und die Rückgewinnung wertvoller Materialien erleichtern.

Für Unternehmen liegt der Mehrwert darin, den eigenen Engpass zu identifizieren und dort anzusetzen, wo Daten fehlen, unstrukturiert vorliegen, nicht vertrauenswürdig weitergegeben werden können oder Rückgewinnungsprozesse durch fehlende Produktinformationen und nicht kreislauffähiges Design erschwert werden. Projekte wie der Transferhub bieten dafür einen praxisnahen Erprobungsraum, in dem Unternehmen geeignete Technologien kennenlernen und ihren Nutzen für die eigenen Prozesse bewerten können.

Die Arbeiten wurden durch die Projekte „Transferhub – Digitalisierung & Circular Economy im Prosperkolleg" (EFRE-20800649 und EFRE-20800650) sowie „Circular Performer Emscher-Lippe" (EFRE-20600019) unterstützt. Die Projekte werden durch das ***MWIKE.NRW*** *finanziert und von der Europäischen Union im Rahmen des EFRE/JTF-Programms NRW 2021–2027 kofinanziert.*

Literatur

[1] Europäische Kommission. (2026, 3. Juli). Digital Product Passport. Internal Market, Industry, Entrepreneurship And SMEs. Abgerufen am 19. August 2026, von https://single-market-economy.ec.europa.eu/single-market/digital-product-passport_en

[2] Dao, A. (2026). Digital Product Passport Readiness: Preliminary evidence on regulatory information gaps, digitalisation challenges and service provider engagement. In Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.19317687

[3] Rohrschneider, D., Pehlke, M., Handmann, U. & Jansen, M. (2026). LLM-based JSON Mapping and Blockchain Integration for Digital Product Passports. Digital Business, 6(1), 100167. https://doi.org/10.1016/j.digbus.2026.100167

[4] Carls, V., Fedder, S., Jansen, M. (2026): Vertrauen durch Transparenz: Wie Blockchain Lieferketten und Produktlebenszyklen sicher macht. Prospektiven – Neues zur zirkulären Wertschöpfung 2026/02. Bottrop: Prosperkolleg e.V.

[5] Schmidt, L., Hübschke, M., Carls, V., Buss, E., Lier, S., Holschbach, E. & Jansen, M. (2023). Implementation and Evaluation of Blockchain-Based Applications in SMEs' Supply Chains: Proof-of-Origin and Process Automation. Lecture Notes in Networks And Systems, 3–12. https://doi.org/10.1007/978-3-031-45155-3_1

[6] Caldarelli, G. (2020). Understanding the Blockchain Oracle Problem: A Call for Action. Information, 11(11), 509. https://doi.org/10.3390/info11110509

[7] Carls, V., Schmidt, L. & Jansen, M. (2023). Evaluation and Comparison of a Private and a Public Blockchain Solution for Use in Supply Chains of SMEs Based on a QOC Analysis. Lecture Notes in Networks And Systems, 388–397. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21229-1_36

[8] Duddek, M., Drüen, B. & Da Rocha, S. H. F. S. (2024). Robotisierte Verfahrenstechnik in der Circular Economy. In Sustainable Development Goals (SDG) – Umsetzung in Praxis, Lehre und Entscheidungsprozessen (S. 119–134). https://doi.org/10.1007/978-3-658-43338-3_9

[9] Duddek, M. & Freitas Seabra da Rocha, S.H. (2022). Robotized Pre-recycling for Improved Material Recovery. In: Leal Filho, W., Azul, A.M., Doni, F., Salvia, A.L. (eds) Handbook of Sustainability Science in the Future. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68074-9_71-1

[10] Kumari, A. & Sahu, S. K. (2023). A comprehensive review on recycling of critical raw materials from spent neodymium iron boron (NdFeB) magnet. Separation And Purification Technology, 317, 123527. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.123527